

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Jednofázové brzdění trojfázového asynchronního elektromotoru

Single Phase Braking of Three-Phase Asynchronous Motor

Zadání bakalářské práce

Student:

Michal Kaprál

Studijní program:

B2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907R001 Elektroenergetika

Téma:

Jednofázové brzdění trojfázového asynchronního elektromotoru
Single Phase Braking of Three-Phase Asynchronous Motor

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor jednofázového brzdného zapojení trojfázového elektromotoru s kroužkovou kotvou.
2. Proved'te měření asynchronního elektromotoru pro stanovení prvků náhradního schematu.
3. Proved'te měření asynchronního elektromotoru v zapojení jednofázové brzdy.
4. Porovnejte výsledky měření s teoretickými výpočty.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Bašta,J., Kulda,V., Pavlásek,F. a kol.: Měření na indukčních strojích, Praha, SNTL 1962
2. Chmelík, K.: Asynchronní a synchronní elektrické stroje, skripta VŠB-TU Ostrava, 2002
3. Michalec,J., Peřina,J.: Elektrické stroje I, skripta ČVUT Praha, 1989

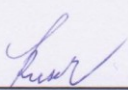
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

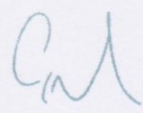
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Václav Čech, Ph.D.**

Datum zadání: 19.11.2010

Datum odevzdání: 06.05.2011




prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry


prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě dne 6.5.2011

.....

Poděkování:

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce, Ing. Václavu Čechovi, Ph.D., za čas, který mi věnoval při měření v laboratoři a za cenné rady poskytnuté při vypracování této práce.

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá jednofázovým brzděním třífázového asynchronního elektromotoru. V první části je teoretický rozbor momentu asynchronního motoru a způsobů jeho brzdění, dále je postáno jednofázové brzdné zapojení. Ve druhé části jsou měření asynchronního motoru za účelem stanovení parametrů náhradního schéma. Třetí část se zabývá měřením elektromotoru v zapojení jednofázové brzdy. Ve čtvrté části jsou výpočtem ověřeny na měřené hodnoty. V závěrečné části jsou shrnuty měřené a vypočtené výsledky.

KLÍČOVÁ SLOVA

Asynchronní motor, momentová charakteristika, jednofázová brzda

ABSTRACT

This Bachelor thesis deals with single-phase braking of the free-phase asynchronous electromotor. In the first part is found a theoretical analysis of induction motor torque and its braking means, further in this section is described single-phases braking involvement. In the second part are included measurements of induction motor in order to determination of spare circuit parameters. The third part deals with metering of electromotor in wiring of the single-phase brake. In the fourth part are measured values verified by calculation. The final section of bachelor thesis summarises measured and calculated results.

KEY WORDS

Asynchronous motor, torque characteristics, single phase braking

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Značka	Název veličiny	Jednotka
$\cos \varphi$	účinník motoru	[-]
$\cos \varphi_0$	účinník naprázdno	[-]
$\cos \varphi_K$	účinník nakrátko	[-]
I_0	proud naprázdno	[A]
I_{1U}, I_{1V}, I_{1W}	fázové proudy	[A]
$I_{11U}, I_{12U}, I_{11V}, I_{12V}$	sousledné, zpětné složky fázových proudů	[A]
I'_2	proud statoru přepočítaný na rotor	[A]
I_K	proud nakrátko	[A]
I_{MAX}	maximální hodnota proudu	[A]
I_n	jmenovitý proud	[A]
I_Z	záběrný proud	[A]
M	moment motoru	[Nm]
m_1, m_2	počet fází statoru, rotoru	[-]
M_1, M_2	sousledná, zpětná složka momentu	[Nm]
M_{MAX}	maximální moment	[Nm]
M_Z	záběrný moment	[Nm]
n	otáčky motoru	[min-1]
n_s	synchronní otáčky	[min-1]
P_1	příkon motoru	[W]
P_2	Výkon motoru	[W]
q_m	momentová přetížitelnost	[-]
R_2	odpor rotoru	[Ω]
R_{Fe}	odpor představující ztráty v železe	[Ω]
R_K	odpor nakrátko	[Ω]
s	skluz motoru	[-]
s_{bk}	skluz zvratu při režimu jednofázové brzdy	[-]
s_n	jmenovitý skluz	[-]
s_k	skluz zvratu	[-]
U_0	napětí naprázdno	[V]
U_1	napětí na statoru	[V]
U_{1U}, U_{1V}	napětí na fázích U a V	[V]

$U_{11U}, U_{12U}, U_{11V}, U_{12V}$	sousledné a zpětné složky napětí	[V]
U_K	napětí nakrátko	[V]
X_0	reaktance naprázdno	[Ω]
$X_{1\sigma}, X'_{2\sigma}$	rozptylová reaktance statoru, rotoru	[Ω]
X_K	reaktance nakrátko	[Ω]
X_μ	magnetizační reaktance	[Ω]
Z_0	impedance naprázdno	[Ω]
Z_{11}, Z_{12}	sousledná a zpětná impedance stroje	[Ω]
Z_K	impedance nakrátko	[Ω]
ΔP_0	ztráty naprázdno	[W]
ΔP_{Cu}	ztráty ve vinutí	[W]
ΔP_{Fe}	ztráty v železe	[W]
ΔP_{j1}	ztráty ve vinutí statoru	[W]
ΔP_{j2}	ztráty ve vinutí rotoru	[W]
ΔP_K	ztráty nakrátko	[W]
ΔP_m	mechanické ztráty	[W]
η	účinnost motoru	[%]

OBSAH

ÚVOD.....	9
1 TEORETICKÝ ROZBOR JEDNOFÁZOVÉHO BRZDNÉHO ZAPOJENÍ	
TROJFÁZOVÉHO ELEKTROMOTORU S KROUŽKOVOU KOTVOU	10
1.1 Moment asynchronního motoru	10
1.2 Zařazení odporu do vinutí rotoru	12
1.3 Způsoby brzdění asynchronního motoru.....	13
1.4 Jednofázový motor na třífázové síti	15
1.5 Jednofázové brzdné zapojení	18
2 MĚŘENÍ ASYNCHRONNÍHO ELEKTROMOTORU PRO STANOVENÍ	
PRVKŮ NÁHRADNÍHO SCHÉMATU.....	21
2.1 Měření odporů.....	21
2.2 Měření naprázdno.....	22
2.3 Měření nakrátko	24
2.4 Momentová charakteristika.....	25
2.5 Pracovní charakteristiky	27
2.6 Stanovení prvků náhradního schématu	29
3 MĚŘENÍ ASYNCHRONNÍHO ELEKTROMOTORU V ZAPOJENÍ	
JEDNOFÁZOVÉ BRZDY	31
3.1 Měření na motoru s odpojenou fází	31
3.2 Měření motoru v zapojení jednofázová brzda.....	32
3.2.1 Měření momentové charakteristiky	32
3.2.2 Průběh proudu při přepnutí na brzdu	33
4 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ S TEORETICKÝMI VÝPOČTY.....	34
4.1 Výpočet momentové charakteristiky jednofázové brzdy	34
4.2 Porovnání změřené a vypočtené momentové charakteristiky	36
ZÁVĚR	37
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	38

ÚVOD

Nejrozšířenějším elektrickým strojem vůbec je asynchronní motor. Asynchronní motor je nejčastěji používán pro svou jednoduchost, nenáročnost na údržbu, poměrně dobrou provozní spolehlivost a pro malou pořizovací cenu. Rozsah výkonů vyráběných asynchronních motorů je značný, a to od několika wattů až po několik desítek MW.

Odtud pramení i jeho použití pro pohon nejrůznějších zařízení a v dnešní době i takových, které vyžadují regulaci rychlosti. Jedná se o ventilátory, čerpadla, pračky, kompresory, stavební stroje, výtahy, jeřáby, některé obráběcí stroje, pohony dopravníků, apod. Důkazem použitelnosti asynchronních motorů pro regulované pohony je jejich současná aplikace u pohonů elektrických lokomotiv. Asynchronní motory v regulovaných pohonech postupně vytlačují z této oblasti stejnosměrné motory. V menší míře se rovněž používají rovněž asynchronní generátory např. pro malé vodní elektrárny, větrné elektrárny apod.

K nevýhodám asynchronních motorů patří zvláště odběr jalové energie z napájecí sítě, kterou tyto stroje potřebují pro svou činnost.

Jako každý elektrický stroj je i asynchronní stroj vratný, tj. může pracovat buď jako motor nebo jako generátor, přičemž přechod z jednoho do druhého stavu je zcela plynulý. Asynchronní stroje mají ještě třetí pracovní oblast, a to oblast indukční brzdy. V tomto případě se rotorem otáčí proti směru točivého magnetického pole statoru. Stroj pak vytváří brzdňý moment.

Tato bakalářská práce pojednává o jednofázovém brzdění třífázových asynchronních motorů. Podstata tohoto brzdění spočívá v zapojení statorového vinutí mezi dvě fáze napájecího napětí při současném zařazení dostatečně velkého odporu do vinutí rotoru. Tím se změní průběhy momentových charakteristik sousledné a zpětné složky a tím i výsledná charakteristika odpovídající jednofázovému motoru na brzdnou charakteristiku. Tento způsob brzdění je nejčastěji aplikován u jeřábů s kroužkovými motory.

1 TEORETICKÝ ROZBOR JEDNOFÁZOVÉHO BRZDNÉHO ZAPOJENÍ TROJFÁZOVÉHO ELEKTROMOTORU S KROUŽKOVOU KOTVOU

1.1 Moment asynchronního motoru

Točivý moment asynchronního stroje je

$$M = \frac{P_i}{\omega_1 s} = \frac{m_2 R_2 I_2^2}{\omega_1 s} \quad (1)$$

Pro přepočtené veličiny rotoru

$$M = \frac{m_1 R_2' I_2'^2}{s \omega_1} = \frac{m_1 R_2' U_1^2}{s \omega_1 \left[\left(R_1 + c_1 \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (X_{1\sigma} + c_1 X_{2\sigma}')^2 \right]} \quad (2)$$

Tento výraz je velmi vhodný pro rozbor práce asynchronního stroje, neboť při $U_1 = \text{konst}$ má pouze jednu proměnnou veličinu s .

Z rovnice (2) plyne velmi důležitý závěr: Při zadaném skluzu s je točivý moment úměrný čtverci napětí statoru U_1 .

Závislost $M = f(s)$ – momentová charakteristika – je na obr. 1.

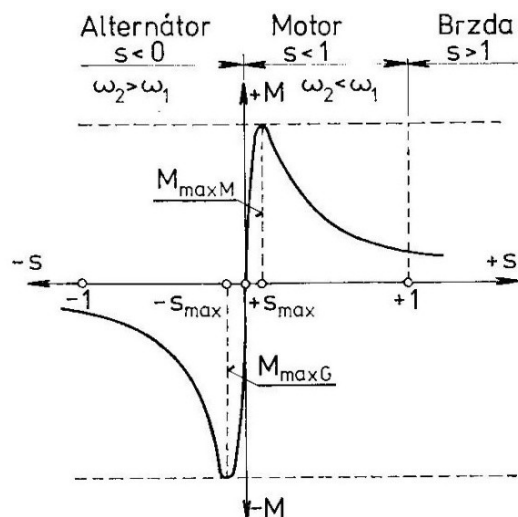
Křivka $M = f(s)$ má dvě maxima: jedno pro skluzu $s < 0$ (alternátor),
druhé pro skluzu $s > 0$ (motor, brzda).

Skluz, při kterém je moment stroje maximální, najdeme ze vztahu

$$\frac{dM}{ds} = 0 \quad (3)$$

Je to tzv. „kritický skluz“ nebo také „skluz zvratu“

$$s_k = \pm \frac{c_1 R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + c_1 X_{2\sigma}')^2}} \quad (4)$$



Obr. 1. Momentová charakteristika asynchronního stroje ve všech provozních stavech

Dosadíme-li s_k (4) do rovnice (3), dostaneme pro maximální moment

$$M_{\max} = \frac{m_1 U_2^2}{2\omega_1 c_1 \left\{ \pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + c_1 X'_{2\sigma})^2} \right\}} \quad (5)$$

Znaménko plus je v rovnicích (4) a (5) pro motor a brzdu, znaménko minus pro alternátor.

Maximální moment stroje pracujícího jako alternátor $M_{\max G}$ je větší než maximální moment motoru $M_{\max M}$, jak plyne ze vztahu

$$\frac{M_{\max G}}{M_{\max M}} = - \frac{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + c_1 X'_{2\sigma})^2}}{-R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + c_1 X'_{2\sigma})^2}} \quad (6)$$

Budeme-li dělit jmenovatele i čitatele pravé strany rovnice výrazem $c_1 R'_2$, dostaneme

$$\frac{M_{\max G}}{M_{\max M}} = - \frac{c_1 \frac{R'_2}{R_1} + s_{\max}}{c_1 \frac{R'_2}{R_1} - s_{\max}} \quad (7)$$

Maximální moment M_{\max} nezávisí na odporu R_2 – viz rovnice (5), odpor R_2 má však vliv na velikost skluzu zvratu s_{\max} , při kterém moment stroje má své maximum. [2]

1.2 Zařazení odporu do vinutí rotoru

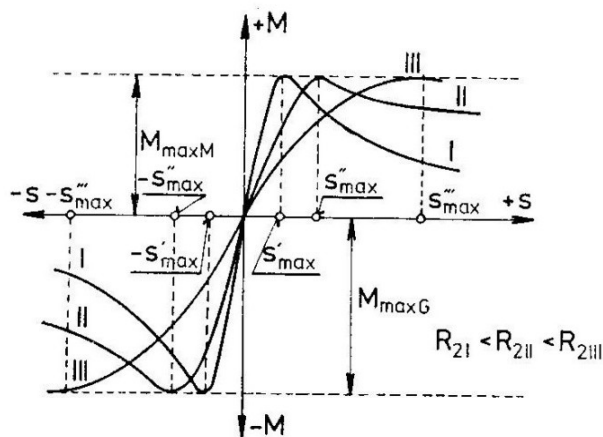
Na obrázku 2 jsou momentové charakteristiky pro tři různé hodnoty odporu rotoru

$$R_{2I} < R_{2II} < R_{2III} \quad (8)$$

a jim odpovídající skluzu zvratu

$$s'_{\max} < s''_{\max} < s'''_{\max} \quad (9)$$

Jak patrně, při změně odporu rotoru R_2 se tvar křivky $M = f(s)$ dosti mění, avšak hodnoty $M_{\max M}$ a $M_{\max G}$ zůstanou beze změny.



Obr. 2. Závislost momentu na odporu vinutí rotoru

Zvětšení odporu statoru R_1 snižuje hodnotu $M_{\max M}$ a zvyšuje $M_{\max G}$.

Při $s = 0$ je točivý moment $M = 0$, neboť v tomto případě je $i_{I2} = 0$. Při $s = 1$, tj. když rotor je v klidu, má točivý moment motoru hodnotu M_{z} , tzv. záběrný moment. Tento moment může být vyjádřen v N·m, anebo v poměrných jednotkách. Jednotkou momentu je pak jmenovitý moment stroje při jmenovitých proudech I_{1n} a I_{2n} a jmenovitém skluzu s_n .

Jmenovitý moment je

$$M_n = \frac{m_2 R_2 I_{2n}^2}{\omega_1 s_n} \quad (10)$$

a tedy záběrný moment

$$M_z = \frac{m_2 R_2 I_{2z}^2}{\omega_1} \quad (11)$$

kde I_{2z} – proud rotoru při $s = 1$. [2]

1.3 Způsoby brzdění asynchronního motoru

Brzdění protiproudem

Rotor motoru se otáčí proti směru otáčení točivého magnetického pole, takže pro skluz platí vztah

$$s = \frac{n_s - (-n)}{n_s} = \frac{n_s + n}{n_s} > 1 \quad (12) \quad [3]$$

Elektromagnetický moment, vznikající vzájemným působením výsledného točivého pole a proudu rotoru, bude působit ve smyslu otáčení rotoru, bude stroj brzdit.

Jako brzda odebírá stroj ze sítě větší proud, než je proud nakrátko. V momentové charakteristice odpovídá brzdě prodloužená část v oblasti záporných otáček.

Při tomto způsobu brzdění tedy značně vzrůstají satorové i rotorové proudy. U kroužkových motorů můžeme proud snížit zařazováním odporů do rotorového obvodu. Takto tedy nejen ztratíme dobu brzdění motoru, ale snížíme i ztráty ve vinutí a tím se zmenší oteplení motoru. [1]

Nadsynchronní brzdění

Rotor se otáčí ve směru točivého magnetického pole, takže platí vztah

$$n > n_s \quad (13)$$

a skluz je

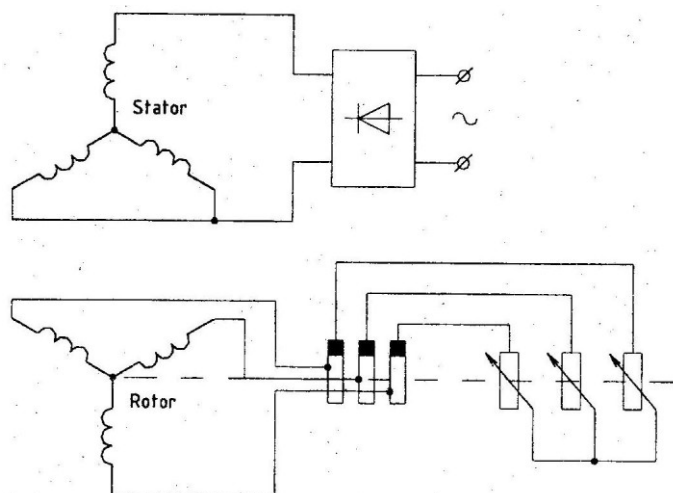
$$s = \frac{n_s - n}{n_s} < 0 \quad (14) \quad [3]$$

Stroj se dostává do generátorového stavu. Ve vodičích rotoru se indukují proudy, které vyvolávají opačný silový (momentový) účinek. Je zřejmé, že stroj v tomto případě energii rekuperuje (vrací) do sítě. Velkou nevýhodou tohoto způsobu brzdění je potřeba velkých otáček (větší, než jsou dovolené otáčky v motorovém chodu). [1]

Brzdění stejnosměrným proudem

Po odpojení statorového vinutí od sítě, budeme-li toto vinutí napájet DC proudem, vznikne stojaté magnetické pole. Pak se ve vinutí otáčejícího se rotoru, připojeného k odporníku, indukuje proud. Tento proud pak způsobuje brzdění, neboť z motoru se stane generátor.

Zapojení statorového vinutí při tomto druhu brzdění může být různé. Jedna fáze může zůstat nezapojena nebo se dvě fáze spojí paralelně apod. [1]



Obr. 3. Schéma zapojení brzdění stejnosměrným proudem [1]

Brzdění v jednofázovém spojení

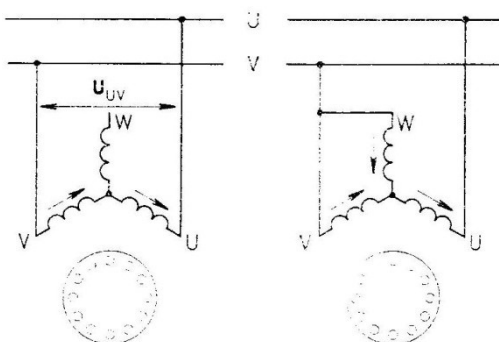
Lze je realizovat jen u asynchronních motorů kroužkových, popř. u motorů nakrátko s odporovou kotvou. Připojíme-li asynchronní kroužkový motor na síť jednofázově, vznikne v jeho vzduchové mezeře podle Leblancova teorému pulsující pole. Toto pole umožňuje vznik sousledné a zpětné složky momentu. Výsledný moment je dán součtem složky sousledné a zpětné a prochází prvním a třetím kvadrantem. Zařazením rezistoru do obvodu rotoru se sousledné a zpětné složky posunou a výsledná momentová charakteristika prochází druhým a čtvrtým kvadrantem a toho lze využít k brzdění pracovních mechanismů s pasivním i aktivním zátěžným momentem. [5]

Podrobněji bude tento způsob brzdění popsán v samostatné kapitole.

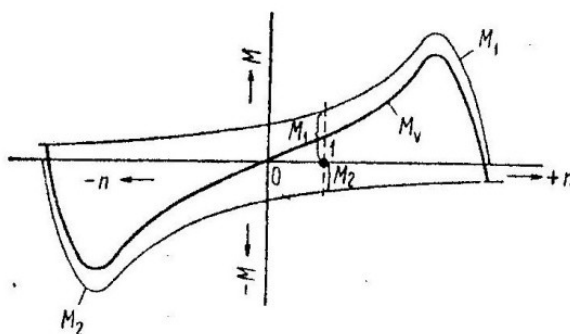
1.4 Jednofázový motor na třífázové síti

Obecné poznatky

Jako jednofázový motor může pracovat i trojfázový, je-li jedna jeho fáze odpojena nebo spojena paralelně s další fází (obr. 4).



Obr. 4. Dva způsoby jednofázového zapojení trojfázového motoru



Obr. 5. Závislost momentu M a jeho složek M_1 a M_2 jednofázového asynchronního motoru na skluzu s . Spodní stupnice skluzů s je pro moment M_1 , vrchní pro moment M_2 . [3]

Jednofázový proud statorového vinutí vybudí střídavé a v prostoru stojící magnetické pole, které můžeme rozložit na dvě proti sobě se otáčející pole, tj. na sousledné a zpětné pole. Jestliže rotor stojí, vytvoří sousledné a zpětné pole v součinnosti s proudy rotoru dva točivé momenty, které jsou stejně veliké a působí proti sobě. Záběrný moment ($s = 1$) jednofázového motoru, který nemá zařízení pro rozběh, je proto roven nule (obr. 5). Začneme-li vnější silou otáčet rotorem v tom či onom směru, bude sousledný M_1 a zpětný M_2 moment měnit svou velikost a jejich součet

$$M = M_1 + M_2 \neq 0 \quad (15)$$

bude mít již jistou hodnotu, odlišnou od nuly. Bude-li tato hodnota větší než moment zátěžný

$$M > M_p \quad (16)$$

bude se asynchronní motor rozbíhat. [2]

Trojfázový asynchronní motor napájený jednofázově

Práci trojfázového asynchronního motoru v jednofázovém zapojení můžeme snadno posoudit metodou souměrných složek.

Z obr. 4 je zřejmé, že jednofázově napájený trojfázový motor představuje dílčí případ nesouměrného napájení, kdy proud jedné fáze se rovná nule, nebo kdy napětí dvou fází jsou stejná.

Posuďme první případ, pro který platí

$$I_{1U} = I_{1W} + I_{12U} \quad (17)$$

$$I_{1V} = a^2 I_{1U} + a I_{12U} \quad (18)$$

$$I_{1W} = a I_{1U} + a^2 I_{12U} = 0 \quad (19)$$

$$I_{1U} + I_{1V} + I_{1W} = 0 \quad (20)$$

kde $a = e^{j(2/3)\pi}$, indexy 1 a 2 odpovídají sousledným a zpětným proudům.

Z těchto rovnic najdeme vztahy mezi proudy všech fází a jejich souslednými i zpětnými složkami

$$I_{1U} = -I_{1V} \quad (21)$$

$$I_{1W} = 0 \quad (22)$$

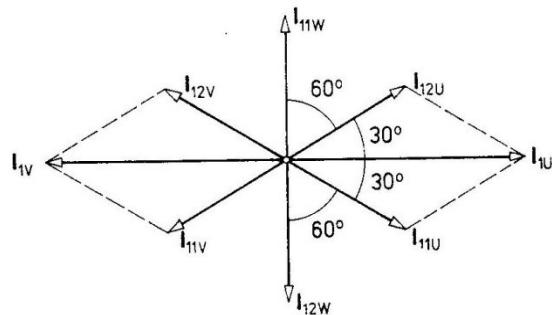
$$I_{11U} = -I_{12V} \quad (23)$$

$$I_{11V} = -I_{12U} \quad (24)$$

$$I_{11W} = -I_{12W} \quad (25)$$

$$I_{12U} = \frac{I_{1U}}{\sqrt{3}} e^{j(\pi/6)} \quad (26)$$

$$I_{11U} = \frac{I_{1U}}{\sqrt{3}} e^{-j(\pi/6)} \quad (27)$$



Obr. 6. Fázorový diagram sousledných a zpětných proudů.

Napětí na fázích U a V jsou

$$U_{1U} = U_{11U} + U_{12U} = I_{11U} Z_{11}(s) + I_{12U} Z_{12}(s) \quad (28)$$

$$U_{1V} = U_{11V} + U_{12V} = I_{11V} Z_{11}(s) + I_{12V} Z_{12}(s) \quad (29)$$

kde $Z_{11}(s)$, $Z_{12}(s)$ – sousledná a zpětná impedance jedné fáze trojfázového motoru při skluzu s .

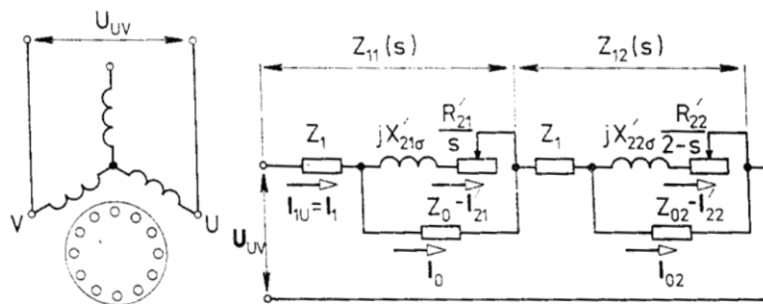
Síťové napětí na svorkách motoru je

$$U_s = U_{1U} - U_{1V} = Z_{11}(s)(I_{11U} - I_{11V}) + Z_{12}(s)(I_{12U} - I_{12V}) \quad (30)$$

nebo (obr. 6)

$$U_s = [Z_{11}(s) + Z_{12}(s)] I_{1U} \quad (31)$$

Z této rovnice plyne, že náhradní schéma jednofázově napájeného trojfázového motoru mohou tvořit dvě sériově zapojená normální schémata trojfázového stroje (obr. 4), z nichž jedno $[Z_{11}(s)]$ odpovídá motorovému chodu a druhé $[Z_{12}(s)]$ brzdnému chodu, při kterém má rotor vůči zpětnému poli skluz $1 + (1 - s) = 2 - s$.



Obr. 7. Náhradní schéma jednofázově napájeného trojfázového asynchronního motoru

Při práci asynchronního trojfázového motoru připojeného k nesouměrnému napětí platí, že

$$R'_{22} > R'_{21} \quad (32) \quad \text{a} \quad X'_{22\sigma} < X'_{21\sigma} \quad (33)$$

Totéž platí i při jednofázovém napájení. To proto, že při jmenovitém zatížení je skluz s malý, kmitočet zpětných proudů rotoru se téměř rovná dvojnásobku kmitočtu proudu statoru. Při takovém kmitočtu se může podstatně zvětšit odpor a poněkud zmenšit rozptylová reaktance rotoru.

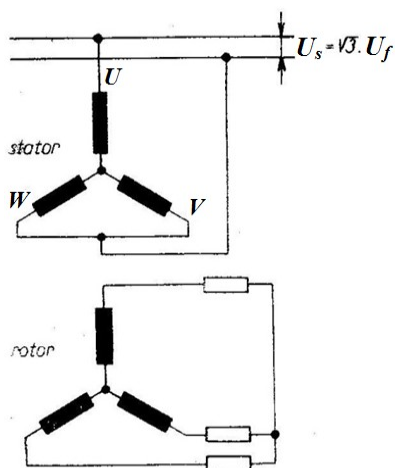
Točivý moment motoru je

$$M = M'_1 + M'_2 = \frac{R'_{21} I'^2_{21}}{\omega_1 s} - \frac{R'_{22} I'^2_{22}}{\omega_1 (2-s)} \quad (34)$$

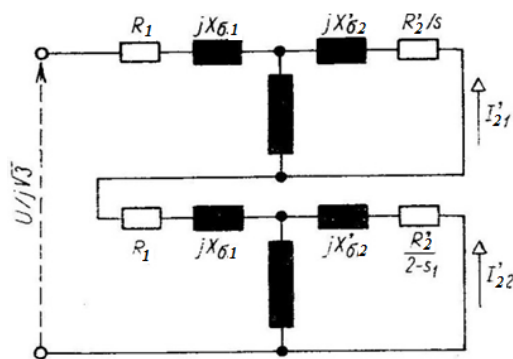
kde I'_{21} , I'_{22} – jsou proudy určené z náhradního schématu obr. 4. [2]

1.5 Jednofázové brzdné zapojení

Indukčním strojem můžeme brzdít buď v oblasti skluzů $s > 1$, jestliže otáčíme rotorem proti magnetickému poli, anebo v oblasti skluzů $s < 0$, jestliže otáčíme rotorem ve směru otáčení magnetického pole, a to rychlostí $n > n_s$. Avšak v oblasti skluzů $s = 1$ až 0 není možno brzdít při trojfázovém napájení. Je však možno použít jednofázového napájení podle obr. 8.



Obr. 8. Jednofázové brzdné zapojení asynchronního motoru.



Obr. 9. Náhradní schéma jednofázového brzdného zapojení

Stroj dává brzdňý moment v obou smyslech otáčení, jestliže na kroužky rotoru připojíme vhodné odpory. Podobně jako u Görgešova jevu dostaneme zde, ovšem pro stator, podmínku pro složková napětí $U_1 = U_2$, takže $U_U = 2U_1$

$$U_{vU} = U_{wU} = U_s = U_U - U_W = 2U_1 - (a + a^2)U_1 = 3U_1 \quad (35)$$

z čehož

$$U_1 = U_2 = U_s / 3 \quad (36)$$

Proudy dostaneme pomocí impedancí stroje Z_{11} a Z_{12} pro souslednou a zpětnou složku

$$I_U = I_1 + I_2 = \frac{U_1}{Z_{11}} + \frac{U_2}{Z_{12}} = U_1 \frac{Z_{11} + Z_{12}}{Z_{11}Z_{12}} = U_s \frac{Z_{11} + Z_{12}}{3Z_{11}Z_{12}} \quad (37)$$

$$I_V = \frac{U_s}{3} \frac{aZ_{11} + a^2Z_{12}}{Z_{11}Z_{12}} \quad (38)$$

$$I_W = \frac{U_s}{3} \frac{a^2Z_{11} + aZ_{12}}{Z_{11}Z_{12}} \quad (39)$$

Ze sítě přichází proud I_U , kterému podle (37) odpovídá náhradní schéma na obr. 9. Vidíme, že toto schéma předpisuje mechanické spojení dvou indukčních strojů, jejichž statory se paralelně připojí k síti tak, aby se magnetická pole otáčela proti sobě. Výsledný moment bude

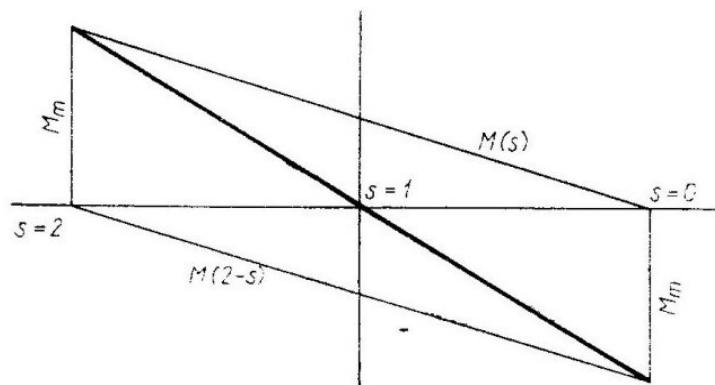
$$M(s) - M(2-s) \quad (40)$$

Jelikož stroj je připojen ke sdruženému ke sdruženému napětí U_s , bude sousledné napětí fázové

$$U_1 = \frac{U_s}{3} = \frac{U_f \sqrt{3}}{3} = \frac{U_f}{\sqrt{3}} \quad (41)$$

Proto moment vyvozený souslednou složkou bude menší než při trojfázovém napájení v poměru

$$\left(\frac{U_1}{U_f} \right)^2 = \frac{1}{3} \quad (42)$$



Obr. 11. Průběh momentu u jednofázového brzdného zapojení s odporem v rotoru.

Použitím Klossova vztahu můžeme napsat

$$M \approx \frac{M_m}{3} \left[\frac{2}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}} - \frac{2}{\frac{2-s}{s_m} + \frac{s_m}{2-s}} \right] \quad (43)$$

kde M_m je moment zvratu při jmenovitém trojfázovém chodu. Bez odporu přiloženého na kroužky rotoru by stroj pracoval jako jednofázový motor. Jakmile však zařadíme odpory do rotorového obvodu tak, aby skluz zvratu stoupl asi na $s_m \sim 2$, probíhá momentová charakteristika téměř přímkově, přičemž se obrátí smysl momentu: ke kladné rychlosti patří záporný moment a opačně; stroj tedy pracuje v obou směslech otáčení jako brzda, viz obr. 11. [6]

2 MĚŘENÍ ASYNCHRONNÍHO ELEKTROMOTORU PRO STANOVENÍ PRVKŮ NÁHRADNÍHO SCHÉMATU

Typ motoru

P112M06

IP44, IM1001, No 9400203, 2 kW, S3 40 %, 50 Hz, 906 min⁻¹, izol: F, 65kg

stat Y 380 V 7,4 A

rot Y 90 V 15,5 A

MEZ Frenštát, 1989; ČSN 350300

Použité přístroje

Dynamometr: Komut. DYN 3f, typ: KS 26-4

prov: Bd1; tvar: HO; čís: 235205, 50 Hz, 530 kg

stat: Y, 380 V, 12 A rot: 33,5 V

MEZ Vsetín, 1962; ČSN IS OL. A/B

Mili-ohm metr: GOM 801 G (0,01 mΩ)

Měřicí transformátory proudu: TL 20, T.P. 0,05%

5 VA; 50Hz; 0,5-1-2-5-10-20-50-100/5 A

výr. čísla: 126 405 002; 3 059 427; 252 014 2

Odpor: SO V 1a

IP10; NO 169; 20,5 kg; ÚV40010

3x5 Ω; 152 V; 25 A

ZSE-MEZ Postřelmov k.p.; 1988; ČSN 358111

2.1 Měření odporů

Přídavný odpor

$R_{U-U5} = 0,07 \Omega$

$R_{V-V5} = 0,08 \Omega$

$R_{W-W5} = 0,08 \Omega$

$R_{U-U4} = 0,36 \Omega$

$R_{V-V4} = 0,36 \Omega$

$R_{W-W4} = 0,38 \Omega$

$R_{U-U3} = 0,98 \Omega$

$R_{V-V3} = 0,99 \Omega$

$R_{W-W3} = 0,99 \Omega$

$R_{U-U2} = 2,42 \Omega$

$R_{V-V2} = 2,51 \Omega$

$R_{W-W2} = 2,43 \Omega$

$R_{U-U1} = 5,2 \Omega$

$R_{V-U1} = 5,21 \Omega$

$R_{W-U1} = 5,24 \Omega$

Měření probíhalo před měřením na motoru.

Statorové vinutí

$$R_{U-V} = 4,84 \, \Omega$$

$$R_{V-W} = 4,83 \, \Omega$$

$$R_{W-U} = 4,84 \, \Omega$$

Rotorové vinutí

$$R_{U-V} = 0,52 \, \Omega$$

$$R_{V-W} = 0,51 \, \Omega$$

$$R_{W-U} = 0,51 \, \Omega$$

2.2 Měření naprázdno

Měření naprázdno provádíme u samostatně pracujícího motoru (mechanicky odpojeném od dynamometru) v oblasti, kdy předpokládáme při jmenovitém kmitočtu stálé otáčky. Charakteristiku naprázdno ($I_0 = f(U_0)$) měříme při postupném snižování napětí z hodnoty, která by neměla přesáhnout hodnotu 110 %. Současně s charakteristikou naprázdno měříme i ztráty naprázdno. [4]

Měření závislosti proudu, účinníku a ztrát naprázdno na napětí

Tabulka naměřených hodnot:

U_0 [V]	I_0 [A]	$\cos \varphi_0$	ΔP_0 [W]	U_0 [V]	I_0 [A]	$\cos \varphi_0$	ΔP_0 [W]
245,82	7,93	0,15	888,25	130,85	2,85	0,16	180,49
232,74	6,82	0,15	712	119,91	2,59	0,17	160,36
224,39	6,25	0,14	607,37	111,41	2,39	0,19	148,39
218,88	5,92	0,14	549,63	99,09	2,13	0,2	129,01
208,65	5,36	0,14	461,03	87,85	1,89	0,23	113,79
199,73	4,94	0,14	403,65	80,38	1,72	0,26	106,81
190,75	4,57	0,14	356,68	68,53	1,5	0,3	93,63
182,62	4,28	0,14	321,52	57,52	1,29	0,38	85,89
171,04	3,91	0,14	280,41	50,29	1,19	0,45	80,48
158,44	3,54	0,14	243,82	39,67	1,05	0,58	73,29
148,81	3,3	0,15	217,58	28,44	1,03	0,74	65,68
140,45	3,08	0,15	199,52	18,2	1,31	0,8	57,42

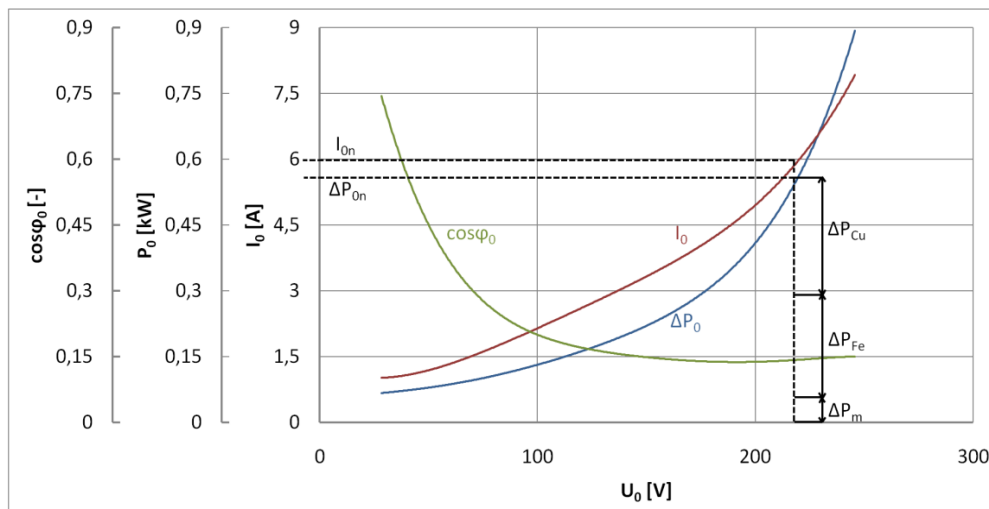
Velikost odporů statoru po měření naprázdno:

$$R_{UV} = 5,05 \, \Omega$$

$$R_{UW} = 5,04 \, \Omega$$

$$R_{VW} = 5,04 \, \Omega$$

Zobrazení závislosti proudu, účinníku a ztrát naprázdno na napětí:



Mechanické ztráty odečtené z grafu:

$$\Delta P_m = 55 \text{ W}$$

Ztráty ve vinutí:

$$\Delta P_{Cu} = 3 \cdot R_{lf} \cdot I_0^2 = 3 \cdot 2,517 \cdot 5,98^2 = 270,027 \text{ W}$$

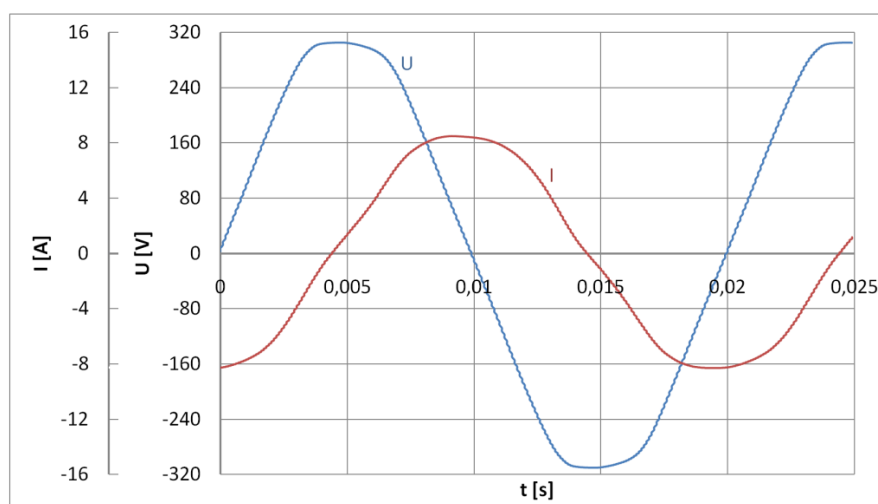
Ztráty v železe:

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_0 - (\Delta P_{Cu} + \Delta P_m) = 560 - (270,027 + 55) = 234,973 \text{ W}$$

Účinník při chodu naprázdno:

$$\cos\varphi_0 = \frac{\Delta P_{0n}}{3 \cdot U_n \cdot I_{0n}} = \frac{560}{3 \cdot 220 \cdot 5,98} = 0,142$$

Zobrazení průběhů proudu a napětí



Určení účinníku z časových průběhů při měření naprázdno, při nichž napětí a proud prochází nulou:

$$\cos \varphi_0 = \cos \left(\frac{t_I - t_U}{T} \cdot 360 \right) = \cos \left(\frac{0,02445 - 0,01998}{0,02} \cdot 360 \right) = 0,166$$

2.3 Měření nakrátko

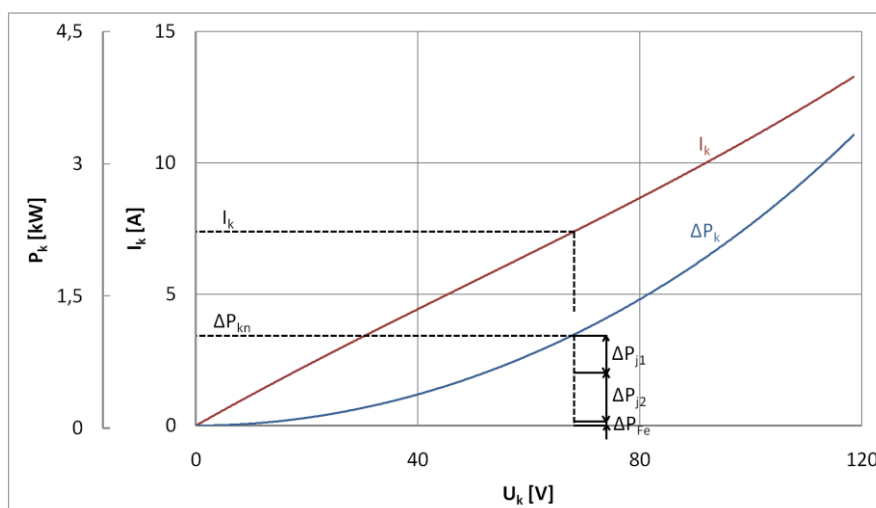
Stavem nakrátko rozumíme napájení statorového vinutí napětím jmenovitého kmitočtu při rotoru spojeném nakrátko a zabrzděném. Při tomto stavu je motor ve stavu spouštění a proto je možno z výsledků měření určit hodnoty důležité pro spouštění, tj. záběrný proud i moment. Měření se musí provádět při sníženém napětí. [4]

Měření závislosti proudu a ztrát nakrátko na napětí

Tabulka naměřených hodnot:

U_K (V)	I_K (A)	ΔP_K (W)	U_K (V)	I_K (A)	ΔP_K (W)
118,56	13,27	3321	67,53	7,31	1020,05
110,56	12,26	2850,59	55,85	6,1	695,68
102,27	11,21	2407,98	43,2	4,76	415,34
91,23	9,93	1894,25	31,59	3,55	222,22
82,78	8,97	1547,21			

Zobrazení závislosti proudu a ztrát nakrátko na napětí:



Velikost odporů statoru po měření nakrátko:

$$R_{UV} = 5,38 \, \Omega$$

$$R_{UW} = 5,37 \, \Omega$$

$$R_{VW} = 5,36 \, \Omega$$

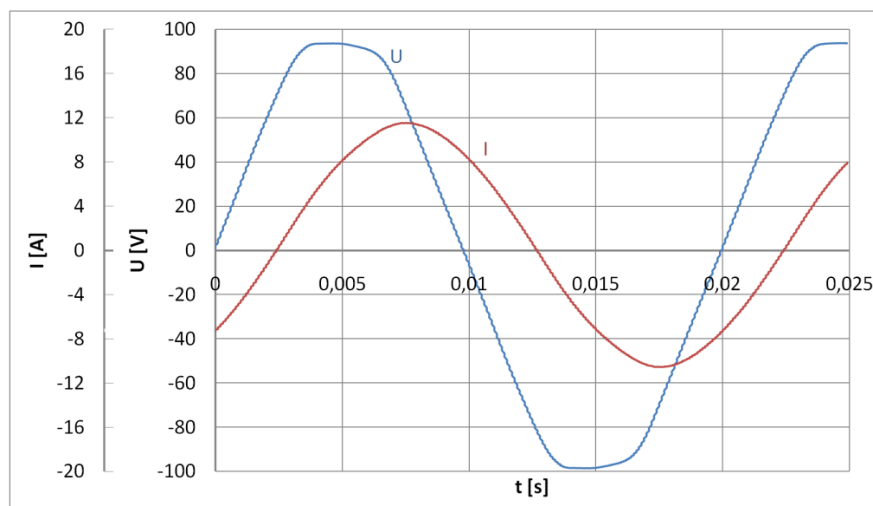
Ztráty ve vinutí statoru:

$$\Delta P_{j1} = 3 \cdot R_{lf} \cdot I_K^2 = 3 \cdot 2,685 \cdot 7,4^2 = 441,092 \, \text{W}$$

Ztráty ve vinutí rotoru:

$$\Delta P_{j2} = \Delta P_K - (\Delta P_{j1} + \Delta P_{Fe}) = 1045 - (441,092 + 31,6) = 572,31 \, \text{W}$$

Zobrazení průběhů proudu a napětí



Určení účinníku z časových průběhů při měření nakrátko, při nichž napětí a proud prochází nulou:

$$\cos \varphi_K = \cos \left(\frac{t_I - t_U}{T} \cdot 360 \right) = \cos \left(\frac{0,02245 - 0,01998}{0,02} \cdot 360 \right) = 0,714$$

2.4 Momentová charakteristika

Momentová charakteristika je závislost točivého momentu na otáčkách, nebo na skluzu ($M=f(n)$, $M=f(s)$) při konstantním napětí a kmitočtu. Při současném měření zjistíme rovněž závislost $I=f(n)$.

Přepočet momentů a proudů měřených při sníženém napětí na jmenovité napětí U_{1n} :

$$M_1 = M \cdot \left(\frac{U_{1n}}{U_1} \right)^2 \quad I_1 = I \cdot \frac{U_{1n}}{U_1}$$

kde $M(I)$ je moment (proud) změřený při sníženém napětí

$U_{1n} (U_1)$ jmenovité (měřené snížené) napětí [4]

Tabulka naměřených hodnot při jmenovitém napětí:

n [min ⁻¹]	M_{220} [Nm]	I_{220} [A]	n [min ⁻¹]	M_{220} [Nm]	I_{220} [A]
888	28,45	16,06	947	14,22	12,76
895	26,49	15,56	953	12,26	12,52
904	24,53	15	960	10,79	12,34
907	23,54	14,74	964	9,32	12,3
917	21,58	14,18	970	7,85	12,12
920	20,6	14	974	6,38	12,08
921	20,6	13,94	979	4,91	12,02
924	19,62	13,74	982	4,41	12
929	18,64	13,54	985	3,43	11,98
934	17,66	13,18	988	2,45	12,06
937	16,68	13,12	990	1,96	12,04
943	15,21	12,9	993	0,98	12,02

Tabulka naměřených hodnot při sníženém napětí:

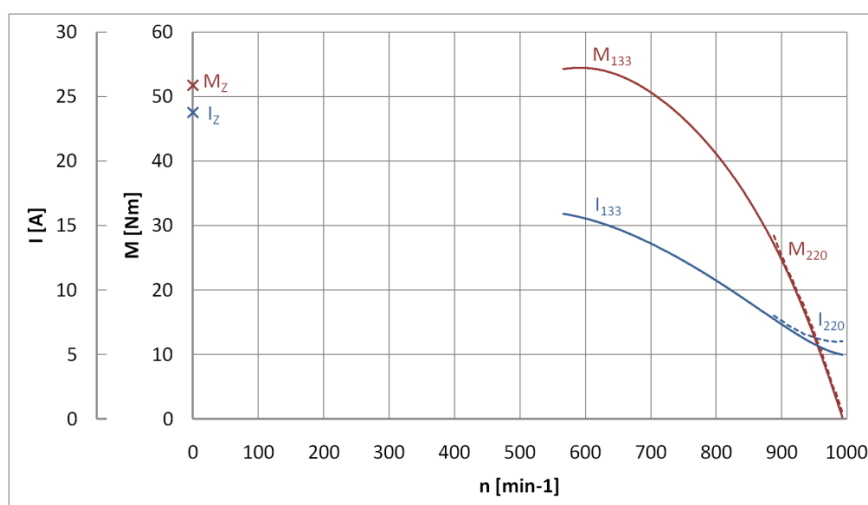
n [min ⁻¹]	M_{220} [Nm]	I_{220} [A]	n [min ⁻¹]	M_{220} [Nm]	I_{220} [A]
566	54,23076	15,90769	862	30,86393	8,444615
585	54,47702	15,75538	892	26,84177	7,632308
640	53,68353	14,90923	910	22,81961	7,056923
695	51,00209	13,72462	933	17,45672	6,481538
744	46,97993	12,47231	941	15,02154	5,973846
780	43,47764	11,32154	960	9,385042	5,449231
810	40,24897	10,49231	972	6,703601	5,263077
830	37,56753	9,764615	980	4,022161	5,178462
850	33,54537	9,138462	986	2,68144	5,110769

Záběrný proud a moment byl zjištěn z měření nakrátko:

$$I_Z = I_K \cdot \frac{U_n}{U_K} = 7,4 \cdot \frac{220}{68,5} = 47,53 \text{ A}$$

$$M_Z = M_K \cdot \left(\frac{U_n}{U_K} \right)^2 = 5,02 \cdot \left(\frac{220}{68,5} \right)^2 = 51,78 \text{ Nm}$$

Zobrazení průběhu momentové charakteristiky:



2.5 Pracovní charakteristiky

Pracovní charakteristiky jsou závislosti příkonu, proudu, skluzu, účinnosti a účinníku na výkonu při jmenovitém napětí a kmitočtu. Pracovní charakteristiky se měří pro kontrolu zaručených hodnot i výpočtu asynchronního motoru, zejména u strojů, kde je ověřování uvedených hodnot z kruhového diagramu obtížné.

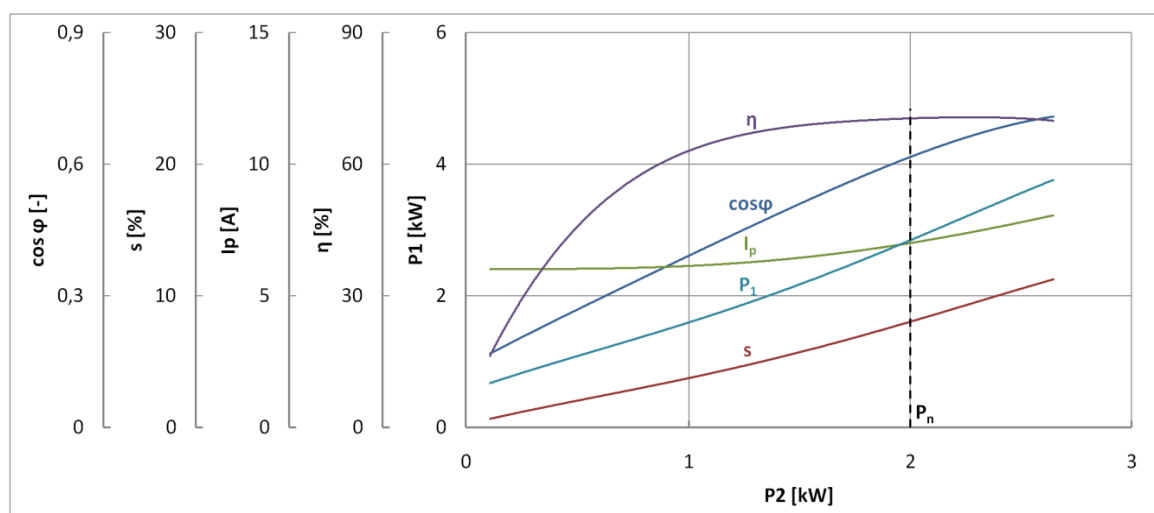
Odpory statoru a rotoru po měření při zatížení:

Stator	Rotor
$R_{UV} = 5,59 \Omega$	$R_{UV} = 5,59 \Omega$
$R_{UW} = 5,58 \Omega$	$R_{UW} = 5,58 \Omega$
$R_{VW} = 5,57 \Omega$	$R_{VW} = 5,57 \Omega$

Tabulka naměřených hodnot:

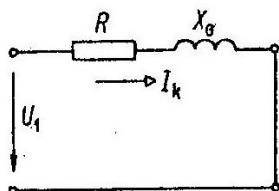
P_2 [W]	$\cos \varphi$	s [%]	I [A]	η [%]	P_1 [W]	P_2 [W]	$\cos \varphi$	s [%]	I [A]	η [%]	P_1 [W]
2645,51	0,71	11,2	8,03	70,63	3745,6	1223,77	0,44	4,7	6,26	66,6	1837,53
2482,47	0,69	10,5	7,78	69,95	3548,83	1084,83	0,41	4	6,17	64,24	1688,78
2321,7	0,67	9,6	7,5	70,15	3309,84	940,8	0,38	3,6	6,15	59,88	1571,15
2236,23	0,66	9,3	7,37	70,01	3194,31	797,19	0,34	3	6,06	58,2	1369,67
2072,48	0,63	8,3	7,09	70,82	2926,54	650,38	0,31	2,6	6,04	52,08	1248,89
1984,75	0,61	8	7	70,01	2835,13	502,86	0,27	2,1	6,01	45,9	1095,64
1898,45	0,6	7,6	6,87	69,74	2722,11	453,96	0,26	1,8	6	44,49	1020,3
1813,29	0,58	7,1	6,77	70,07	2587,73	354,16	0,23	1,5	5,99	38,18	927,56
1727,1	0,56	6,6	6,59	71,66	2410,26	253,74	0,21	1,2	6,03	30,45	833,26
1636,39	0,54	6,3	6,56	70,02	2336,95	203,41	0,19	1	6,02	26,6	764,64
1501,55	0,51	5,7	6,45	68,8	2182,52	102,01	0,17	0,7	6,01	14,63	697,31
1410,64	0,49	5,3	6,38	68,24	2067,04						

Průběh pracovních charakteristik:



2.6 Stanovení prvků náhradního schématu

Z měření nakrátko:



Obr. 12. Schéma zapojení chodu nakrátko [3]

Určení odporu R'_2 ze ztrát nakrátko:

$$\Delta P_K = 3 \cdot R_K \cdot I_K^2 = 3 \cdot (R_1 + R'_2) \cdot I_K^2 \Rightarrow R'_2 = \frac{\Delta P_K}{3 \cdot I_K^2} - R_1 = \frac{1045}{3 \cdot 7,4^2} - 2,685 = 3,676 \, \Omega$$

Výpočet celkového proudu a impedance při stavu nakrátko:

$$R_K = R_1 + R'_2 = 2,685 + 3,676 = 6,361 \, \Omega$$

$$Z_K = \frac{U_K}{\sqrt{3} \cdot I_K} = \frac{68,2}{7,4} = 9,216 \, \Omega$$

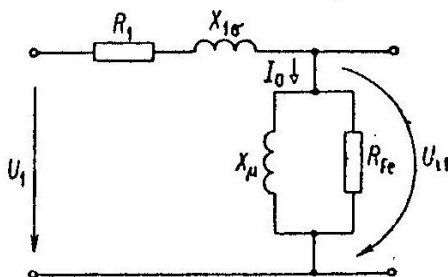
Výpočet celkové reaktance nakrátko:

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} = \sqrt{9,216^2 - 6,361^2} = 6,669 \, \Omega$$

Výpočet rozptylové reaktance na statoru a rotoru s uvažováním jejich rovností:

$$X_{1\sigma} = X'_{2\sigma} = \frac{X_K}{2} = \frac{6,669}{2} = 3,334$$

Z měření naprázdno



Obr. 13. Náhradní schéma chodu naprázdno [3]

Stanovení odporu ze ztrát v železe:

$$\Delta P_{Fe} = \frac{3 \cdot U_0^2}{R_{Fe}} \Rightarrow R_{Fe} = \frac{3 \cdot U_0^2}{\Delta P_{Fe}} = \frac{3 \cdot 220^2}{244,973} = 592,72 \, \Omega$$

Výpočet reaktance naprázdno:

$$X_0 = Z_0 \cdot \sin \varphi_0 = \frac{U_0}{\sqrt{3} \cdot I_0} \cdot \sin \left[\arccos \left(\frac{\Delta P_0}{3 \cdot U_0 \cdot I_0} \right) \right] = \frac{220}{5,98} \cdot \sin \left[\arccos \left(\frac{560}{3 \cdot 220 \cdot 5,98} \right) \right] = 36,421 \, \Omega$$

Určení magnetizační reaktance:

$$X_\mu = X_{11} - X_{1\sigma} = 36,421 - 3,334 = 33,087 \, \Omega$$

Určení momentu:

$$M = \frac{m_f \cdot R'_2 \cdot U_1^2}{\omega \cdot s_n \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2 \right]} =$$

$$M = \frac{3 \cdot 3,676 \cdot 220^2}{\frac{\pi \cdot 1000}{30} \cdot 0,095 \cdot \left[\left(2,685 + \frac{3,676}{0,095} \right)^2 + (3,334 + 3,334)^2 \right]} = 30,54 \, \text{Nm}$$

Výpočet proudu rotoru:

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2}} = \frac{220}{\sqrt{\left(2,685 + \frac{3,676}{0,095} \right)^2 + (3,334 + 3,334)^2}} = 5,248 \, \text{A}$$

3 MĚŘENÍ ASYNCHRONNÍHO ELEKTROMOTORU V ZAPOJENÍ JEDNOFÁZOVÉ BRZDY

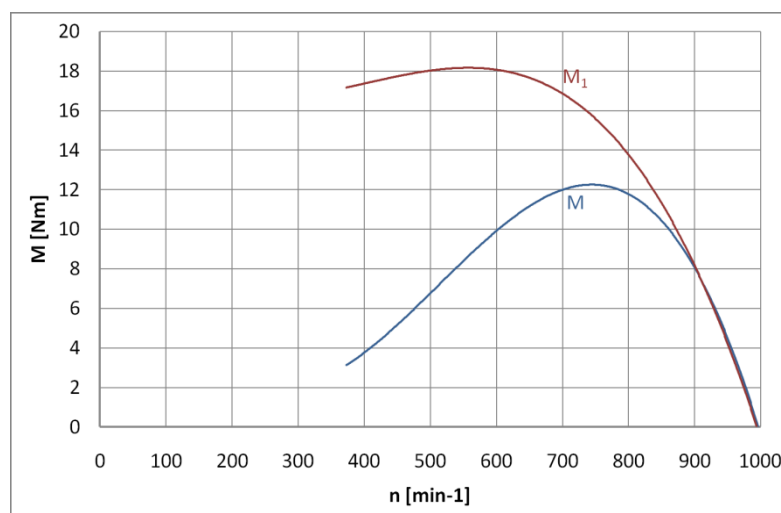
3.1 Měření na motoru s odpojenou fází

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro výsledný moment a souslednou složku momentu:

n [min ⁻¹]	M [Nm]	n [min ⁻¹]	M_1 [Nm]	n [min ⁻¹]	M_1 [Nm]	n [min ⁻¹]	M_1 [Nm]
1000	0	986	0,893813	892	8,947255	695	17,0007
950	3,9325	980	1,34072	862	10,28798	640	17,89451
880	9,049861	972	2,234534	850	11,18179	585	18,15901
745	12,56925	960	3,128347	830	12,52251	566	18,07692
623	10,72576	941	5,00718	810	13,41632		
505	6,536011	933	5,818908	780	14,49255		
373	3,268006	910	7,606535	744	15,65998		

Sousledná složka momentu byla přepočítána ze sníženého napětí na napětí jmenovité.

Průběh momentové charakteristiky



3.2 Měření motoru v zapojení jednofázová brzda

3.2.1 Měření momentové charakteristiky

Měření s odporem 5 Ω :

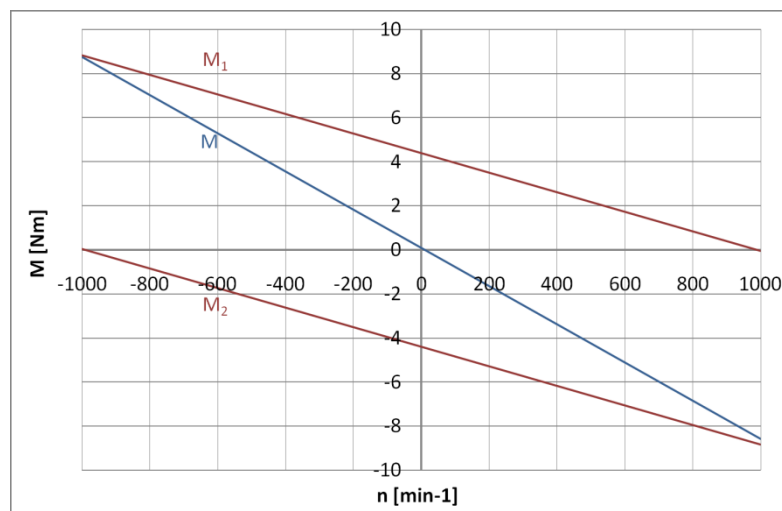
Tabulky naměřených hodnot pro souslednou a zpětnou složku momentu:

n [min^{-1}]	M_1 [Nm]	n [min^{-1}]	M_1 [Nm]	n [min^{-1}]	M_2 [Nm]	n [min^{-1}]	M_2 [Nm]
1000	0,00	-9	4,74	822	-7,85	-10	-4,58
815	0,62	-132	5,23	717	-7,52	-152	-3,66
690	1,21	-320	5,82	638	-7,19	-317	-2,98
560	1,86	-438	6,28	560	-6,87	-447	-2,32
447	2,32	-560	6,87	438	-6,28	-560	-1,86
317	2,98	-638	7,19	320	-5,82	-690	-1,21
152	3,66	-717	7,52	132	-5,23	-815	-0,62
10	4,58	-822	7,85	9	-4,74	-1000	0,00

Tabulka naměřených hodnot jednofázové brzdy:

n [min^{-1}]	M [Nm]	n [min^{-1}]	M [Nm]
1000	-8,53	-208	2,06
782	-6,57	-336	3,04
620	-5,4	-421	3,92
381	-3,43	-517	4,71
69	-0,69	-1000	8,53

Zobrazení průběhu momentové charakteristiky:

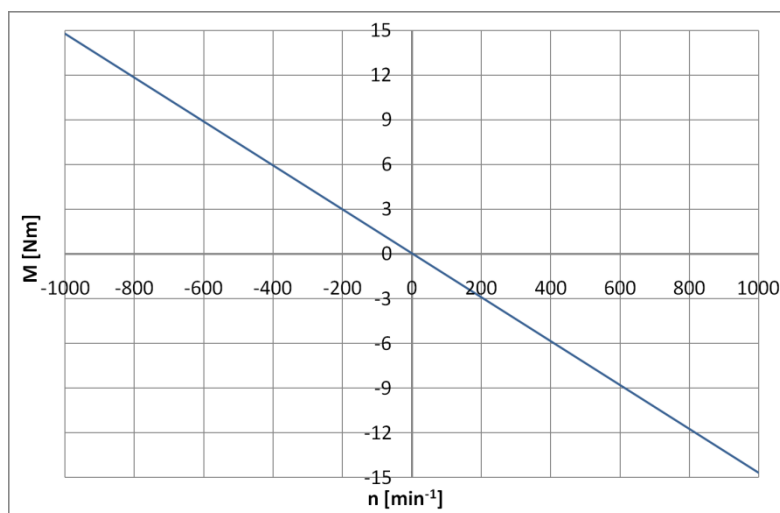


Měření s odporem 2,5 Ω :

Tabulka naměřených hodnot:

n [min^{-1}]	M [Nm]	n [min^{-1}]	M [Nm]
1000	-14,71	-364	5,49
791	-11,48	-437	6,47
643	-9,42	-537	8,04
401	-5,89	-620	9,32
208,2	-3,14	-734	10,79
70	-1,18	-1000	14,71
-205	3,34		

Zobrazení průběhu momentové charakteristiky:



3.2.2 Průběh proudu při přepnutí na brzdu

Velikost proudu při trojfázovém chodu se zařazeným odporem do rotoru 5,22 Ω :

$$I_1 = 5,9 \text{ A}$$

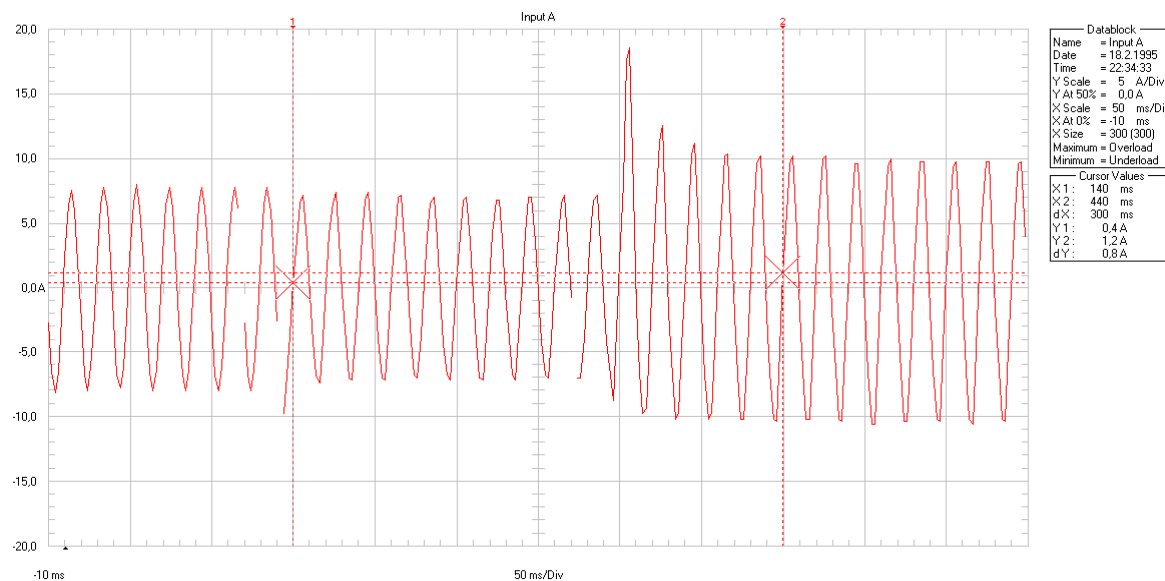
$$I_{1\text{MAX}} = 8,34 \text{ A}$$

Velikost proudu po přepnutí motoru na jednofázovou brzdou:

$$I_b = 7,5 \text{ A}$$

$$I_{b\text{MAX}} = 10,61 \text{ A}$$

Zobrazení průběhu proudu při přepnutí na brzdu:



4 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ S TEORETICKÝMI VÝPOČTY

4.1 Výpočet momentové charakteristiky jednofázové brzdy

Parametry asynchronního motoru jsou stanoveny z katalogu asynchronních motorů [7]:

$$P_2 = 2 \text{ kW}$$

$$U_n = 380 \text{ V}$$

$$n_n = 905 \text{ min}^{-1}$$

$$I_n = 7,4 \text{ A}$$

$$n_s = 1000 \text{ min}^{-1}$$

$$U_2 = 90 \text{ V}$$

$$M_n = 21,1 \text{ Nm}$$

$$I_2 = 15,5 \text{ A}$$

$$q_m = 2,8$$

$$R_2/20^\circ\text{C} = 0,22 \Omega$$

Určení potřebných parametrů motoru:

$$M_{MAX} = M_n \cdot q_m = 21,1 \cdot 2,8 = 59,08 \text{ Nm}$$

$$s_n = \frac{n_0 - n_n}{n_0} = \frac{1000 - 905}{1000} = 0,095$$

$$s_k = s_n \cdot \left(q_m + \sqrt{q_m^2 - 1} \right) = 0,095 \cdot \left(2,8 + \sqrt{2,8^2 - 1} \right) = 0,514$$

Skuz zvratu při režimu jednofázového brzdění se rotorovým odporem 5,22 Ω :

$$s_{bk} = s_{kn} \cdot \left(1 + \frac{R_p}{R_{2f}} \right) = 0,514 \cdot \left(1 + \frac{5,22}{1,4 \cdot 0,22} \right) = 9,23$$

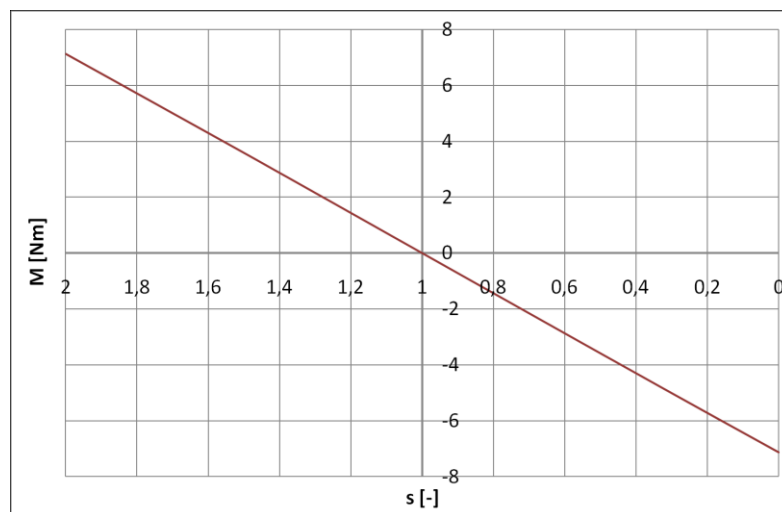
Skuz zvratu při režimu jednofázového brzdění se rotorovým odporem 2,45 Ω :

$$s_{bk} = s_{kn} \cdot \left(1 + \frac{R_p}{R_{2f}} \right) = 0,514 \cdot \left(1 + \frac{2,45}{1,4 \cdot 0,22} \right) = 4,6$$

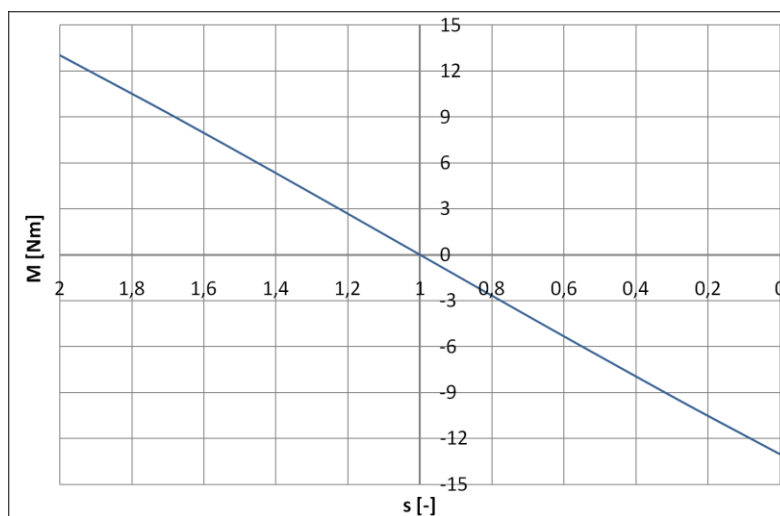
Brzdňý moment při režimu jednofázového brzdění je dán vztahem:

$$M_b = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{2 \cdot M_{MAX}}{\frac{s}{s_{bk}} + \frac{s_{bk}}{s}} - \frac{2 \cdot M_{MAX}}{\frac{(2-s)}{s_{bk}} + \frac{s_{bk}}{(2-s)}} \right)$$

Průběh vypočtené momentové charakteristiky s odporem 5,22 Ω :

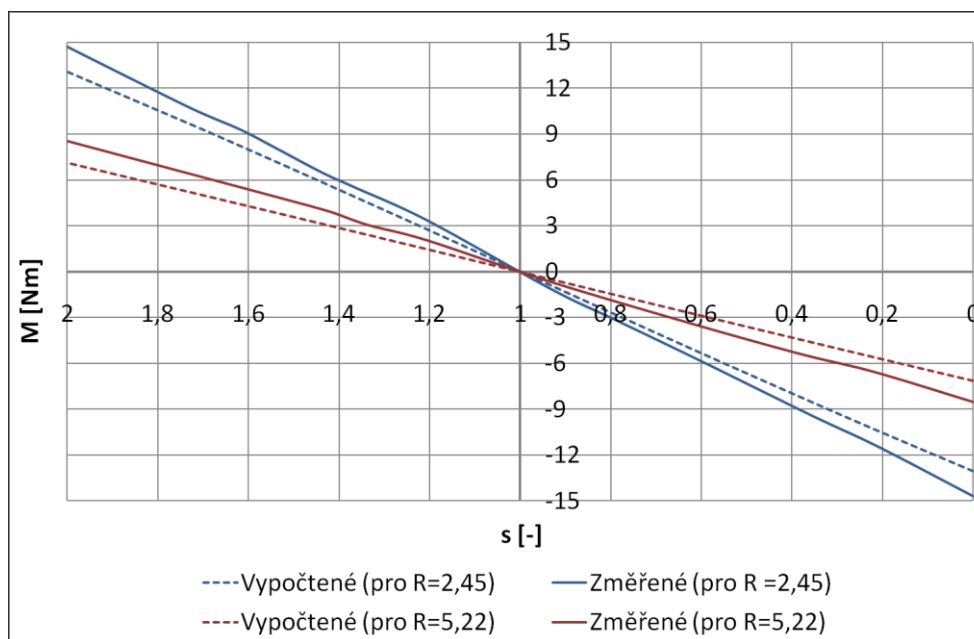


Průběh vypočtené momentové charakteristiky s odporem 2,45 Ω :



4.2 Porovnání změřené a vypočtené momentové charakteristiky

V grafu je srovnání změřené a vypočtené brzdné charakteristiky pro různé hodnoty přidavného rotorového odporu:



ZÁVĚR

První část bakalářské práce obsahuje teoretické poznatky zjištěné z doporučené a zvolené literatury, které souvisí s jednofázovým brzděním třífázového asynchronního motoru. Nejprve byla probrána momentová charakteristika a její měnící se průběh zařazením odporu do vinutí rotoru. Dále jsou probrány způsoby brzdění asynchronních motorů a následně je prostudován asynchronní motor z hlediska připojení na jednofázovou síť. Poté je teoreticky popsán vliv zařazení odporu do vinutí rotoru a zapojení statoru mezi dvě fáze napájecího napětí, čímž vznikne moment potřebný k brzdění motoru.

Při stanovení parametrů náhradního schématu byly vypočteny z měření nakrátko rozptylové reaktance $X_{1\sigma} = X'_{2\sigma} = 3,334 \, \Omega$ a odpor rotoru $R'_2 = 3,676 \, \Omega$, dále z měření naprázdno velikost odporu $R_{Fe} = 592,72 \, \Omega$ a magnetizační reaktance $X_\mu = 33,09 \, \Omega$.

Momentová charakteristika byla změřená při sníženém napětí až do maximálního momentu, změřené hodnoty momentu a jim příslušné proudy museli tedy být přepočteny na napětí jmenovité. Odečtený jmenovitý moment vyšel $M_n = 24,24 \, \text{Nm}$ a proud $I_1 = 7,46 \, \text{A}$. Záběrné hodnoty $M_z = 51,78 \, \text{Nm}$ a $I_z = 47,53$ byly určeny z měření nakrátko a opět přepočteny na jmenovité napětí.

Měřením na motoru s odpojenou fází byla získána momentová charakteristika, která odpovídá charakteristice jednofázového motoru. Tato charakteristika je dána součtem sousledné a zpětné složky momentu a prochází 1. a 3. kvadrantem. Když byl při daném zapojení statoru zařazen dostatečně velký odpor do vinutí rotoru, tak aby se skluz zvratu zvýšil nad hodnotu 2, charakteristika motoru se dostala do 2. a 4. kvadrantu a umožňovala tedy brzdění motoru. Zvyšování rotorového odporu vedlo ke snižování brzdného momentu. Rozdílný sklon vypočtených a změřených charakteristik je způsoben měřením při vyšších teplotách, než kolik je uvedeno v katalogu a tedy vypočtený skluz zvratu vychází vyšší než při měření. Proud fáze statoru při přepnutí motoru na jednofázovou brzdu, jak plyne ze změřeného průběhu, se zvýší z $I_1 = 5,9 \, \text{A}$ na $I_b = 7,5 \, \text{A}$.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] CHMELÍK, K. *Asynchronní a synchronní stroje*, Ostrava. VŠB – TU Ostrava, 2002. 136 s. ISBN 80-248-0025-X
- [2] PETROV, G. N. *Elektrické stroje 2: Asynchronní stroje – synchronní stroje*. Praha: Academia, 1982. 732 s. 509-21857
- [3] ŘÍHA, J. *Elektrické stroje a přístroje*. Praha: SNTL, 1986. 288 s. ISBN 04-527-86
- [4] Kolektiv katedry elektrických strojů a přístrojů *Měření na elektrických strojích*. Praha: ČVUT, 1970. 99s.
- [5] CAHA, Z.; ČERNÝ, M. *Elektrické pohony*. Praha: SNTL, 1990. 360 s. 04-527-90
- [6] BAŠTA, J.; CHLÁDEK, J.; MAYER, I. *Teorie elektrických strojů*. Praha: SNTL, 1968. 582 s.
- [7] *Trojfázové asynchronní motory hutní jeřábové kroužkové 2 – 18 kW*. Frenštát pod Radhoštěm: Siemens elektromotory s.r.o., 1998. 33 s.